

缓冲与隔振

振动载荷下鸡蛋缓冲包装有限元分析

李昭¹, 曹竹林¹, 孙建明¹, 李炜颖²

(1.河南科技大学 包装工程系, 洛阳 471023; 2.机械工业第六设计研究院有限公司, 郑州 450000)

摘要: **目的** 为降低鸡蛋在流通过程中的破损率, 利用有限元法分析鸡蛋在振动条件下缓冲包装系统的响应特性, 以选择其缓冲包装结构。**方法** 通过鸡蛋压缩实验, 测试鸡蛋的破损强度, 并分析鸡蛋的流通环境, 确定振动的类型、频率和幅值; 以聚苯乙烯泡沫 (Expanded Polystyrene, EPS) 为缓冲材料, 选用 2 种缓冲结构, 建立基于流-固耦合特性的鸡蛋缓冲包装系统有限元模型, 分析不同缓冲厚度下 2 种结构的振动特性。**结果** 通过压缩试验测定鸡蛋破损强度极限值为 5.3 MPa, 为有限元分析提供评价条件。有限元仿真结果表明, 结构 I 应力普遍大于 10 MPa, 不利于鸡蛋的保护, 同等厚度下结构 II 的应力明显减小; 采用结构 II 且缓冲厚度 $\delta > 3$ mm 时可避免鸡蛋在振动过程中发生破损。**结论** 有限元仿真可快速、有效评估鸡蛋缓冲包装, 选取较为有益的缓冲结构, 提升鸡蛋流通中的安全性。

关键词: 鸡蛋; 缓冲包装; 振动; 强度实验; 有限元法

中图分类号: TB482; TB485.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2020)21-0178-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.21.025

Finite Element Analysis of Cushion Package for Egg Subject to Vibration

LI Zhao¹, CAO Zhu-lin¹, SUN Jian-ming¹, LI Wei-ying²

(1.Department of Packaging Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China;
2.Machinery Industry No.6 Design and Research Institute Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China)

ABSTRACT: The work aims to analyze the response characteristics of cushion packaging system for eggs under vibration conditions by finite element method to choose the cushion packaging structure, so as to reduce the breakage rate of eggs in distribution. Firstly, the breakage strength of eggs was confirmed by the compression test and the type, frequency and amplitude of vibration were determined by analyzing the distribution environment of eggs. Then, the finite element models of the egg cushion packaging system based on fluid-solid coupled characteristics were established by two cushion structures, with EPS (Expanded Polystyrene) as the cushion packaging material, to analyze the vibration characteristics of two structures under different cushioning thickness. The ultimate breakage strength of eggs determined through compression test was 5.3 MPa, providing evaluation conditions for finite element analysis. The results of finite element simulation showed that the stress of structure I was generally greater than 10 MPa, which was not conducive to protecting eggs, and the stress of structure II was significantly reduced under the same thickness. Structure II with the cushioning thickness > 3 mm could protect eggs from distribution vibration. Finite element simulation can evaluate egg cushion package quickly and effectively to select more beneficial cushioning structure, and improve the safety of egg during distribution.

KEY WORDS: eggs; cushion package; vibration; strength test; finite element method

收稿日期: 2020-06-23

基金项目: 陕西省印刷包装工程重点实验室开放课题项目 (2017KFKT-01)

作者简介: 李昭 (1987—), 男, 硕士, 河南科技大学讲师, 主要研究方向为包装有限元仿真及优化设计。

鸡蛋从产出到消费者手中，需经过收集、分类、清洗、包装、检验、加工、运输、储存、交易等多道工序，其中造成鸡蛋破损的主要原因为装卸等运输环节。据有关资料显示^[1]：由于破损及破损后的腐化变质所造成的损失占鸡蛋收购量的 10%以上，而其中在装卸等运输环节造成的破损率占 78.5% ~ 81.8%。在流通环境中，振动是引起产品破损的重要因素之一^[2-3]，动、静载荷等复杂因素的影响使振动的发生不可避免，如果振动载荷强度超过蛋壳的破损极限，将导致鸡蛋发生破损。为了降低鸡蛋破损率，确保鸡蛋缓冲包装在装卸搬运中的合理性，需要对鸡蛋的物理、力学特性以及包装系统缓冲性能的变化规律进行深入研究。

目前，对于缓冲包装优化设计的方法主要有实验法和有限元仿真分析法^[4-5]。传统的实验方法虽然能获得较为真实的缓冲效果，但实验周期长、效率低且投入较大。利用有限元仿真分析，可快速获得不同变量条件下包装件的缓冲效果，然后有针对性的进行实验验证，缩短设计周期，提高设计效率。文中利用有限元仿真法对 EPS 鸡蛋缓冲包装在振动载荷下的特性进行研究，以为鸡蛋缓冲包装设计提供指导。

1 鸡蛋强度测定

为确保鸡蛋在运输过程中发生振动时缓冲包装的缓冲性能满足设计需求，需要确定鸡蛋的破损强度^[4-5]，为有限元仿真提供评价指标。按 GB/T 21710 规定对散装鲜鸡蛋进行抽样，以同一规格产品为 1 个批次，每批次随机抽样 2% 进行实验测定^[6]。以 GB/T 8168 包装用缓冲材料静态压缩实验方法为实验参考，对鸡蛋进行强度测定实验^[7]。

1.1 实验准备

1) 实验材料。新鲜鸡蛋，通过筛选挑选质量、形状、大小相似的同批次鸡蛋，购买后立即送往实

验室，确保鸡蛋表面无损伤。

2) 实验设备。微机控制电子式万能实验台，型号 WDW-100，济南正中实验机制造有限公司。

3) 辅助固定装置。由于实验平台为光滑平面，在实验过程中需对鸡蛋进行固定，采用薄 PVC 自制鸡蛋固定装置，对实验结果影响较小，见图 1。

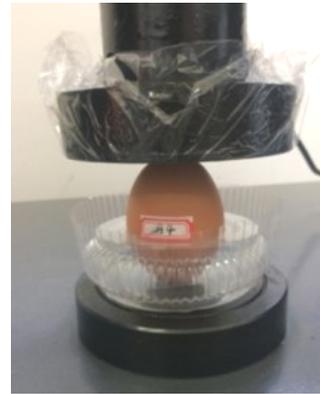


图 1 鸡蛋支架
Fig.1 Egg holder

1.2 实验过程

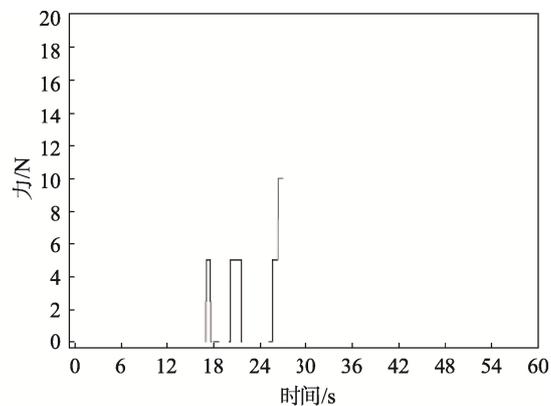
将实验鸡蛋分为 3 组，每组 5 颗，共计 15 颗鸡蛋进行强度压缩实验，对实验鸡蛋进行分组编号。利用微机控制电子式万能实验台测得鸡蛋压缩过程中力-时间曲线，由此得出蛋壳在不同破损阶段承受的最大力，通过等效接触面积计算出蛋壳破损时承受的强度值。

1.3 实验结果

鸡蛋强度实验最终破损情况及力-时间曲线见图 2，经观察分析，当力-时间曲线出现第 1 个峰值时，鸡蛋出现第 1 条裂纹；当力-时间曲线出现第 2 个峰值时，鸡蛋出现多条裂纹；当力-时间曲线出现第 3 个峰值时，鸡蛋发生面破损。通过对 15 组鸡蛋强度



a 鸡蛋破损情况



b 力-时间曲线

图 2 鸡蛋破损实验数据
Fig.2 Experimental data of broken eggs

实验的实验数据进行分析得出：当施加载荷力为 5.3~6 N 时，蛋壳出现裂纹；当载荷力达到 10~15.6 N 时，蛋壳出现小面积破损；当载荷力达到 20 N 以上时出现大面积破损。由于出现裂纹的鸡蛋在长时间的运输过程很容易受到外界细菌的污染从而导致鸡蛋腐败变质，因此在该课题中，认定鸡蛋蛋壳上出现裂缝即视为鸡蛋破损。测量得到鸡蛋与万能实验台的接触面积近似为 1 mm²，由式 $P=F/S$ 计算出鸡蛋出现裂纹时，蛋壳上受到的应力值 $P=5.3$ MPa。

2 有限元模型建立

2.1 鸡蛋缓冲包装结构分析

2.1.1 鸡蛋结构分析

鸡蛋结构见图 3，由于鸡蛋生物结构较为复杂，在进行几何建模时将鸡蛋简化为由蛋壳、蛋液（蛋白和蛋黄）2 部分构成，鸡蛋几何形状可视为由半球体和半椭球体构成的轴对称体^[8]。在该次研究中鸡蛋尺寸：长轴 $D=56$ mm、短轴 $2r=44$ mm、厚度 $\delta=0.38$ mm、蛋形角 $\theta=10^\circ$ 。利用式（1）对鸡蛋进行几何建模。

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{(b+x \tan \theta)^2} = 1 \quad (1)$$

式中： a 为椭圆长半轴； b 为短半轴； θ 为蛋形角； x, y 为鸡蛋轮廓曲线上点的横坐标与纵坐标。

2.1.2 缓冲包装结构分析

市场上常见的鸡蛋缓冲包装有 4 种，见图 4，其材质分别采用纸浆模塑（Molded Pulp）、硬 PVC、EPE 和 EPS，4 种材质中 EPE 和 EPS 主要用于鸡蛋运输

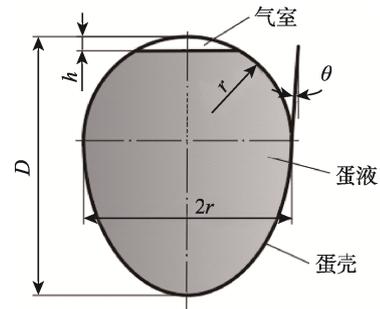


图 3 鸡蛋结构
Fig.3 Egg structure

环节，纸浆模和硬 PVC 主要用于鸡蛋的销售环节。EPE 相对 EPS 更加环保，但价格相对较高。目前 EPS 作为鸡蛋运输时缓冲包装的使用仍相当广泛，因此该课题以 EPS 为研究对象。EPS 作为泡沫结构类型的缓冲材料，其缓冲性能极好而且经济实惠，兼有密度低、易成型加工的优点。

2.2 鸡蛋建模

由于鸡蛋的蛋壳较薄，在振动过程中，蛋液（液体）将对蛋壳（固体）产生一定影响，因此该实验建立了鸡蛋流-固耦合模型。流-固耦合力学是流体力学与固体力学交叉衍生的一门学科，主要研究结构与流体间相互作用^[9]。流-固耦合系统具有一定的复杂性，不能单独计算结构力学或流体力学模块，两者之间相互作用、相互影响，流-固耦合关系利用不同结构单元来模拟相应材料，并通过设置边界条件建立相应关系。仿真使用欧拉单元模拟蛋液，拉格朗日单元模拟蛋壳，两者边界产生接触，蛋液在固定的网格内流动，



图 4 常见鸡蛋缓冲包装
Fig.4 Common cushion packages of egg

通过材料分布来描述蛋液的变形状态。为保证在有限元分析中流-固耦合问题能成功解决，流体场和结构场模型都应经过严格测试，确保每个单场都已正确定义并输入。

忽略蛋壳上众多细小的气孔，视蛋壳为均匀、连续、各向同性的线弹性材料，将蛋壳的形状视为半球体和半椭球体构成的轴对称结构；假设蛋液为均匀、连续、无粘性、只发生小扰动的流体，忽视气室的存在。鸡蛋的具体参数见表 1^[10]，其中蛋液声速为 1500 m/s，粘度为 0.001 kg/m³。

表 1 鸡蛋参数
Tab.1 Egg parameters

结构	密度/(mg·mm ⁻³)	弹性模量/MPa	泊松比
蛋壳	2.532	3000	0.25
蛋液	1.036	5	0.30

2.3 缓冲结构建模

常见的蛋托基本为 5 行×6 列结构，每箱放置 6 个托盘，材质选用 EPS，取其 2 种结构且每种结构选择基本缓冲单元为研究对象，见图 5，结构 I（圆柱形内衬）和结构 II（椭球形内衬）为鸡蛋缓冲托盘最为常用的 2 种缓冲结构。设置缓冲结构为底部边长 54 mm 的正方形，缓冲初始厚度为 3, 5, 7, 9, 11 mm，中空部最大直径均为 44 mm，高为 38 mm。由于该实验只考虑垂直方向上的振动，因此对四周的缓冲厚度不设置变量。EPS 参数见表 2^[11]。

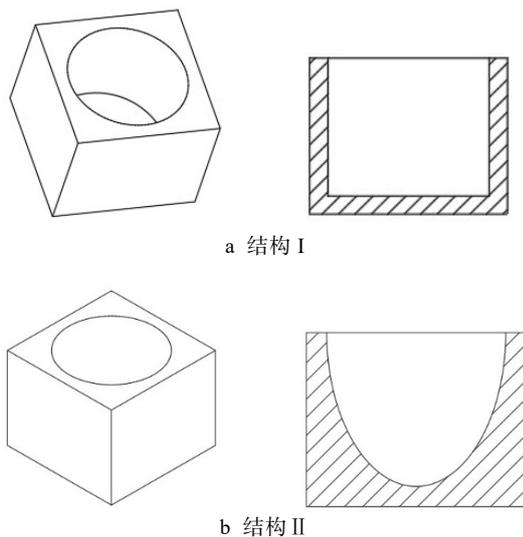


图 5 不同缓冲结构
Fig.5 Different cushion structures

表 2 EPS 参数
Tab.2 EPS parameters

材料	密度/(mg·mm ⁻³)	弹性模量/MPa	泊松比
EPS	0.02	2.40	0.23

2.4 施加载荷与确定边界条件

鸡蛋壳和鸡蛋缓冲托盘采用 C3D4 网格，鸡蛋液采用 C3D8 网格。该课题以公路运输作为鸡蛋的流通环境，振源由运载汽车产生，利用 ABAQUS 软件对其振动进行 CAE 分析^[12]。据资料显示^[13-14]，汽车运输中由于路面不平引起的振动频率大约为 1~30 Hz；而因发动机自身转动引起的振动频率约为 23 Hz，通常集中在 20~30 Hz 之间；汽车运输过程中发生的共振集中出现在 20~30 Hz 之间，因此假设鸡蛋在汽车运输时受到振动的频率为 25 Hz，幅值参考鸡蛋包装件的重量。由于运输过程中主要为垂直方向的振动，故分析时主要考虑垂直方向的受力^[15]。鸡蛋的包装通常 6 个托盘为一箱，每箱 300 个鸡蛋，约 18 kg，则每箱鸡蛋受到的重力为 180 N。由于最下面的托盘受力最大，因此该次分析针对底层的托盘。以每箱为 1 个独立的单位，假设其他包装件的影响被外箱所阻挡。以每个托盘装 30 个鸡蛋来计算，对模型的底部施加峰值为 6 N 的均匀简谐载荷力。同时，由于鸡蛋缓冲包装固定堆放在汽车上，因此假设鸡蛋缓冲包装的底面是固定不动的，将约束施加在鸡蛋缓冲托盘的底部，即底面所有节点位移为 0。鸡蛋壳与鸡蛋缓冲包装建立绑定约束关系。

3 仿真结果分析

3.1 结构 I 仿真结果

选取 EPS 缓冲包装厚度 $\delta=3$ mm, $\delta=5$ mm, $\delta=7$ mm, $\delta=9$ mm 和 $\delta=11$ mm 这 5 组数据进行对比仿真实验，分析包装件的应力分布。鸡蛋缓冲包装在振动载荷作用下的蛋壳应力变化曲线见图 6。由图 6 可知，鸡蛋受振动影响时蛋壳上产生的最大应力值依次为 25.21, 19.29, 16.67, 16.15, 14.74 MPa，最大应力值随着缓冲厚度的增加而逐渐减少；鸡蛋受振动影响而产生的应力变化呈周期性分布，一个完整的应力变

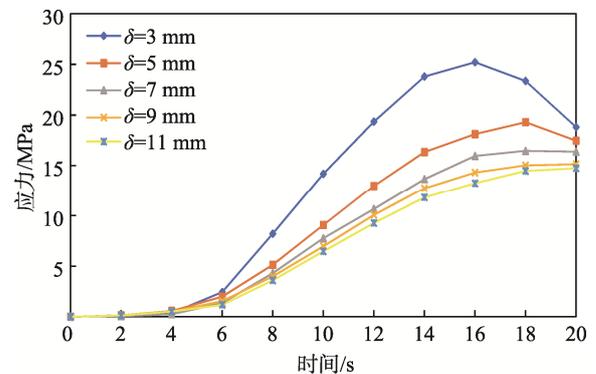


图 6 不同厚度的 EPS 缓冲时蛋壳的应力-时间分布曲线
Fig.6 Stress-time distribution curve of eggshell with different thicknesses of EPS cushion

化周期约在 30~40 s 之间，且周期随着缓冲厚度的增加而逐渐增加。

鸡蛋缓冲包装在振动载荷作用下的蛋壳振动加速度见图 7。由图 7 可知，随着缓冲托盘厚度的增加，蛋壳的振动加速度不断减少；从缓冲 $\delta=3$ mm 时的最大振动加速度 -2.15 m/s^2 到缓冲 $\delta=11$ mm 时的最大振动加速度 -0.88 m/s^2 。缓冲厚度增加，托盘的缓冲性能更好，在振动时蛋壳与托盘的接触面积增大，蛋壳应力分布范围变大，减震效果更好。采用结构 I 仿真实验中，应力普遍大于 10 MPa，不利于鸡蛋的保护。

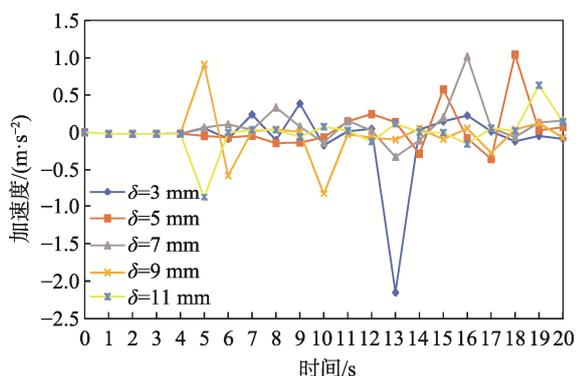


图 7 不同厚度的 EPS 缓冲时蛋壳加速度-时间曲线
Fig.7 Acceleration-time curve of eggshell with different thickness of EPS cushion

3.2 结构II仿真结果

参考结构 I 中 EPS 材料鸡蛋缓冲包装模拟的结果，缓冲结构保持外部基本形状不变，将直径 44 mm、高 38 mm 的中空圆柱结构改为符合鸡蛋外形的椭圆结构。同时，将缓冲厚度更改为 $\delta=2$ mm, $\delta=3$ mm, $\delta=4$ mm, $\delta=5$ mm, $\delta=6$ mm。由仿真结果 (图 8) 可知，鸡蛋受振动影响时蛋壳上产生的最大应力值依次为 5.614, 4.482, 3.907, 3.522, 2.901 MPa，最大应力相对于结构 I 明显减小，同样随着缓冲厚度的增加蛋壳上的应力值不断地减小；结构II下鸡蛋受振动影响而产生的应力同样呈周期变化，但是相对于结构 I

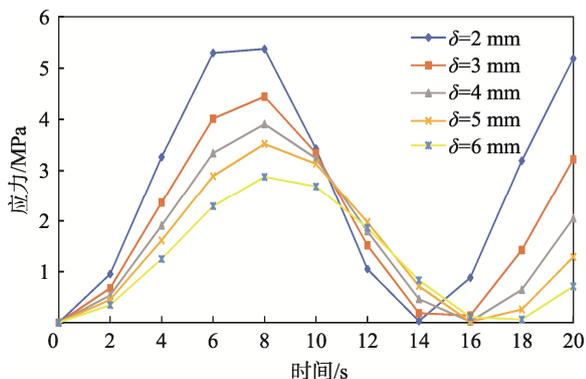


图 8 不同厚度的 EPS 缓冲时蛋壳的应力-时间分布曲线
Fig.8 Stress-time distribution curve of eggshell with different thickness of EPS buffer

其应力变化周期缩短，大约在 14~18 s 之间，周期随缓冲厚度的增加而逐渐增加。

鸡蛋缓冲包装在振动载荷的作用下的蛋壳的振动加速度见图 9。由图 9 可知，随着缓冲托盘厚度的增加，蛋壳的振动加速度不断减少，由于该组仿真缓冲厚度差距不大，因此振动加速度变化不大，最大振动加速度基本在 0.0215 m/s^2 左右。相对于结构 I 中缓冲厚度 $\delta=3$ mm 时的 2.15 m/s^2 到缓冲厚度 $\delta=11$ mm 时的 0.88 m/s^2 ，模型改变后的加速度大幅减少。

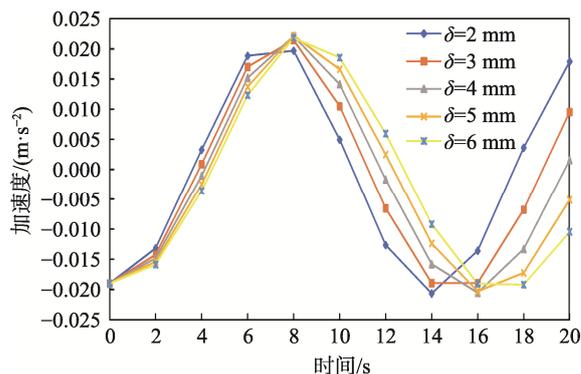


图 9 不同厚度的 EPS 缓冲时蛋壳加速度-时间曲线
Fig.9 Acceleration-time curve of eggshell with different thickness of EPS cushion

结构II增大了缓冲托盘与鸡蛋的接触面积，使结构缓冲能力增强，其缓冲厚度小于结构 I，但缓冲性能却大幅度提高，表明结构II对于鸡蛋具有更好的保护效果且材料用量少；仿真结果表明，采用结构II时缓冲厚度 $\delta > 3$ mm，可避免鸡蛋在振动过程中发生破损。

4 结语

通过压缩实验确定鸡蛋的破损强度，为有限元分析结果提供评价标准。利用有限元仿真对 2 种不同结构鸡蛋缓冲包装进行分析。分析结果表明，增大缓冲包装与鸡蛋的接触面积，可有效降低鸡蛋所受到的振动载荷；缓冲结构II在运输过程中对鸡蛋的保护效果要优于缓冲结构 I。文中设计了一种鸡蛋破损标准的实验方法，并利用有限元法分析了振动载荷下鸡蛋缓冲包装的力学特性，可为类似产品的缓冲包装设计提供一定的参考。另外，文中只考虑单一振动因素对于鸡蛋运输包装的影响，如鸡蛋在运输过程中还存在明显的跌落冲击等其他因素影响时，其缓冲厚度的设计还应综合考虑。

参考文献:

[1] 裴朵. 鲜鸡蛋运输结构包装设计研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2014: 1—6.
PEI Duo. Research on Packaging Design of Fresh Egg Transportation Structure[D]. Beijing: Beijing Univer-

- sity of Technology, 2014: 1—6.
- [2] 孙京超, 杜秉健, 赵伟, 等. 振动防护和涂膜保鲜等不同处理措施对苹果采后贮藏特性的影响[J]. 包装与食品机械, 2019, 37(1): 1—5.
SUN Jing-chao, DU Bing-jian, ZHAO Wei, et al. Effects of Vibration Protection and Coating Preservation on Postharvest Storage Characteristics of Apple[J]. Packaging and Food Machinery, 2019, 37(1): 1—5.
- [3] 刘勰, 徐鹏, 吴玉月, 等. 气调包装材料对其内装甜樱桃振动损伤特性影响的数值分析[J]. 包装与食品机械, 2018, 36(6): 31—36.
LIU Meng, XU Peng, WU Yu-yue, et al. Numerical Analysis of the Effect of Modified Atmosphere Packaging Materials on Vibration Damage Characteristics of Sweet Cherry[J]. Packaging and Food Machinery, 2018, 36(6): 31—36.
- [4] 宋慧芝, 王俊, 叶均安. 鸡蛋蛋壳受载特性的有限元研究[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2006, 32(3): 350—354.
SONG Hui-zhi, WANG Jun, YE Jun-an. Finite Element Study on the Loading Characteristics of Egg Shell[J]. Journal of Zhejiang University: Agriculture and Life Sciences Edition, 2006, 32(3): 350—354.
- [5] 常江, 巩雪, 李丹婷, 等. 鸡蛋缓冲包装设计及其力学性能分析[J]. 包装工程, 2018, 39(3): 55—58.
CHANG Jiang, GONG Xue, LI Dan-ting, et al. Design and Mechanical Property Analysis of Egg Cushioning Packaging[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(3): 55—58.
- [6] GB/T 21710—2016, 蛋与蛋制品生产卫生规范[S].
GB/T 21710—2016, Hygienic Code for Production of Eggs and Egg Products[S].
- [7] GB/T 8168—2008, 包装用缓冲材料静态压缩试验方法[S].
GB/T 8168—2008, Static Compression Test Method of Cushioning Materials for Packaging[S].
- [8] 戴其俊. 基于动力学信号分析的鸡蛋蛋壳裂纹检测研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2017: 3—5.
DAI Qi-jun. Detection of Eggshell Crack Based on Dynamic Signal Analysis[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2017: 3—5.
- [9] 张亦农. 基于流-固耦合的鸡蛋跌落冲击力学特性有限元分析[D]. 天津: 天津科技大学, 2013: 15—32.
ZHANG Yi-nong. Finite Element Analysis of Egg Drop Impact Mechanical Properties Based on Fluid Solid Coupling[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2013: 15—32.
- [10] 吴雪, 张媛, 刘斌, 等. 应用流-固耦合方法的鸡蛋动力学特性研究[J]. 食品工业科技, 2016, 37(23): 311—315.
WU Xue, ZHANG Yuan, LIU Bin, et al. Study on the Dynamic Characteristics of Eggs by Fluid Solid Coupling Method[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(23): 311—315.
- [11] 丁玉平. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的某缓冲包装缓冲特性分析与优化[D]. 无锡: 江南大学, 2014: 3—45.
DING Yu-ping. Analysis and Optimization of Cushioning Characteristics of a Cushioning Packaging Based on ANSYS/LS-DYNA[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2014: 3—45.
- [12] 袁志林, 高翠芝, 江海蛟, 等. 基于 ABAQUS 的 PET 切片包装机钢结构有限元分析[J]. 包装与食品机械, 2018, 36(6): 45—49.
YUAN Zhi-lin, GAO Cui-zhi, JIANG Hai-jiao, et al. Finite Element Analysis of Steel Structure of PET Chip Packaging Machine Based on ABAQUS[J]. Packaging and Food Machinery, 2018, 36(6): 45—49.
- [13] HAMBLIN M. Fatigue of Cantilevered Pipe Fitting Subjected to Vibration[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials and Structures, 2003, 26(8): 695—707.
- [14] 张晶. 电梯产品“以纸代木”包装关键技术研究[D]. 无锡: 江南大学, 2012: 9—12.
ZHANG Jing. Research on the Key Technology of "Paper Instead of Wood" Packaging for Elevator Products[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2012: 9—12.
- [15] 彭国勋. 物流运输包装设计[M]. 北京: 印刷工业出版社, 2012: 3—57.
PENG Guo-xun. Logistics and Distribution Packaging Design[M]. Beijing: Printing Industry Press, 2012: 3—57.